アルミニウム管および銅管と各種心材との電磁圧接*

—マグネチック・インパルス溶接機による電磁圧接に関する研究 (第1報)—

穂苅 等**, 佐藤 忠夫***, 河内 邦夫***, 武藤 章***

Magnetic Impulse Welding of Aluminum Tube and Copper Tube with Some Kinds of Metal Tubes*

—Study on Magnetic Impulse Welding (Report 1)—

by Hitoshi HOKARI**, Tadao SATO***, Kunio KAWAUCHI*** and Akira MUTO***

In this study, aluminum and copper tubes (diameter: 10 mm, thickness: 0.5 mm) were welded to some kinds of bars by MIW (Magnetic Impulse Welding). The joints welded by MIW were evaluated by water tightness test, tension test and microscopic observation. The most suitable clearance between tubes and bars was 0.5 mm for welding under the charged voltage of 14.0 ± 2.5 kV, and it was not dependent on kinds of tubes and bars. Aluminum tubes could be welded with wider clearance than copper tubes, because the plastic deformation of aluminum tubes was easier than that of copper tubes. As bars were harder, tubes were welded better. Degreasing the welded interface had an effect on welding strength. The regular wavy pattern was observed on the welded interface. Microvickers hardness increased as approaching to the welded interface from the base metal of tubes and bars.

Key Words: Magnetic Impulse Welding, electromagnetic force, water tightness test, tension test, clearance, plastic deformation, degreasing

1. 緒 言

電磁圧接は、電磁力を利用してパイプ等の円形素材の重ね合わせ継手面を圧接する接合方法である¹⁾。一般の溶接法に比べ、熱影響による素材強度の低下、脆い金属間化合物の生成が少なく、異種金属接合のためのバインダーを必要としないなどの点から、異種金属間の薄肉パイプの接合に適している。また、特別な加圧装置が不要であり、その接合法の簡便さ、短時間で接合が可能なことから、現場での配管作業に即対応できる技術として期待されている。

本研究では、冷凍機、空調機等に使用されている配管継手部への実用化を目的に、アルミニウムパイプ、及び、銅パイプと同種・異種金属心材の電磁圧接を試みた。特に、圧接前の心材加工の工程を簡略化できるように、テーパなしの試験片を用い、心材の塑性変形と接合面の脱脂の有無の見地から、配管継手部に求められる耐圧性、接合強度を得るための圧接条件の検討を行った。

2. 原 理

電磁圧接は、フレミング左手の法則 (Fleming's left-hand rule) を利用した電磁力のみで圧接を行う接合方法である。Fig. 1 に示す回路²⁾で、給電部からコンデンサーに蓄えられた電気エネルギーをトリガー放電により瞬間的にインダクターコイルに大電流として放電し、コイル内に置かれた導電性の外管に誘導電流を発生させる。その際、外管に作用する電磁力で外管を押し縮めることにより、外管内部に設置された心材と高速で衝突させ圧接を行うのが電磁圧接である。

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

*原稿受付 平成8年11月27日 平成8年度春季全国大会で発表

**正 員 特殊電極(株) Member, TOKUDEN Co., Ltd.

*** 室蘭工業大学 Muroran Institute of Technology

3. 実験方法

3.1 電磁圧接装置

電磁圧接装置の外観図を Fig. 2 に示す。本研究に使用した装置は、パトン研究所製マグネチック・インパルス溶接機 H126M である。本装置は主として、圧接のためのインダクターコイル、圧接中の試料の飛散を防ぐためのワークキャビネット、コンデンサーの充電電圧を設定するセッティングデバイススイッチ、装置を制御・操作するコントロールパネルから構成されている。Fig. 1 で示したように、インダクターコイルの通電部は開口部となっているが、本装置では開口部の隙間を 0.5 mm と狭くし、通電部と他のところとの接合状態に差異がないようにした。本装置の仕様を Table 1 に示す。

本研究では、セッティングデバイススイッチによりコンデンサーの充電電圧を 14.0 ± 2.5 kV と設定し、電磁圧接を試みた。また、インダクターコイルに流れる放電電流波形の一例を Fig. 3 に示す。放電電流は、周期 $14 \mu\text{s}$ の正弦減衰波形である。この正弦減衰波形で最大電流の得られる半周期内に電磁圧接は行われている。

3.2 供試材料

供試材として、外管にはアルミニウム (A1050) と銅 (C1020)、心材にはアルミニウム (A1100)、銅 (C1100)、黄銅 (C3604)、軟鋼 (SS400) を用い電磁圧接を試みた。Table 2 に供試材の化学組成および引張強さを示す。Fig. 4 には供試材の継手形状を示す。本研究では、外管と心材のすき間 (以下「クリアランス」と呼ぶ) を 0.0 mm, 0.5 mm,

Fig. 2 Appearance of Magnetic Impulse Welding H126M.

Table 1 Specifications of MIW H126M

Dimension	1838 mm × 1445 mm × 1820 mm	
Weight	1800 kg	
Power Requirement	200V AC, 13.5 kVA	
Condenser	Capacitance	120 μF
	Rated Voltage	25 kV DC

Fig. 3 Discharged current waveform.

Table 2 Chemical composition (wt%) and Tensile strength of specimens

Tube : Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	others*	Al	Tensile strength
A1050	≤0.25	≤0.40	≤0.05	≤0.05	≤0.05	≤0.05	≤0.03	≤0.03	≥99.50	≥65MPa
Tube : Cu	Cu									Tensile strength
C1020	≥99.96									≥315 MPa
Core : Al	Cu	Mn	Zn	Si + Fe	others*	others**	Al	Tensile strength		
A1100	0.05~0.20	≤0.05	≤0.10	≤1.0	≤0.05	≤0.15	≥99.00	≥75 MPa		
Core : Cu	Cu									Tensile strength
C1100	≥99.90									≥195 MPa
Core : Brass	Cu	Pb	Fe	Zn	Fe + Sn	Tensile strength				
C3604	57.0~61.0	1.8~3.7	≤0.50	Bal.	≤1.2	≥335 MPa				
Core : Fe	P	S	Fe	Tensile strength						
SS400	≤0.050	≤0.050	Bal	400~510 MPa						

*Individual **Total

Fig. 4 Shape and size of specimen.

Fig. 5 Schematic diagram of water tightness test.

1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm と変化させて電磁圧接を試み、その接合部の強度評価を行った。供試材の接合面は、加工の際の切削傷を取り除くため、圧接前にエメリー研磨紙(#400~#1000)を用いて研磨した。さらに、脱脂のためアセトン中で超音波洗浄を約10分間行った。

3.3 接合部強度測定

電磁圧接後の試料の接合部強度の評価方法として、水圧リーク試験、及び、引張試験を行った。水圧リーク試験は、管状試験片内部に水圧をかけ、漏水・破断を検査する試験法である。接合部以外の箇所でも漏水・破断があれば、接合部は管状試験片以上の耐圧強度があり、かつ、全周に渡る良好な接合が得られたものと判断できる。また、部分的な接合の場合、円周上での接合割合に関係なく漏れが発生する。水圧リーク試験に使用した加圧機の概観図を Fig. 5 に示す。

引張試験は、単純引張試験法を用いて、接合部の強度評価を行った。

3.4 接合界面観察

電磁圧接後、試験片の樹脂埋め、研磨を行い、必要があればエッチング処理を施し、接合部界面の顕微鏡観察を行った。なお、接合試験片は、すべて水圧リーク試験により全周にわたる良好な接合が確認された条件のものを用いた。さらに、マイクロビッカース硬度計により接合界面の硬さ測定をした。

4. 実験結果および考察

4.1 水圧リーク試験による接合部強度評価

4.1.1 外管がアルミニウムの場合

外管にアルミニウム、心材にアルミニウム、銅、黄銅、軟鋼を用いた場合の外管と心材のクリアランスに対するリーク破断圧測定結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 のクリアランスとリーク破断圧との関係から次のことが言える。心材の材質に関わらず、クリアランスが0.0 mm のとき、心材が抜けたり、もしくは接合部からの漏水が認められ全周にわたる良好な接合に至らないことがわかった。クリアランスが0.5 mm のときは、すべての試料において、母材(外管)側で破断しており、全周にわたる良好な接合が得られた。クリアランスが1.0 mm のときも、母材破断もしくはそれに近いリーク破断圧で、高い接合強度が得られた。それに対して、クリアランスが1.5 mm, 2.0 mm の場合、心材の材質によって差異が見られ、アルミニウム、銅よりも黄銅、軟鋼のほうがリーク破断圧が大きかった。

衝突速度 v 、衝突加速度 a で、外管が心材に衝突するときの単位面積当たりの衝突エネルギー E は次の式で定義される³⁾。

$$E = mv^2/2 + \lambda (ma)^2/(2E_0) \quad (1)$$

ここで、 m は外管の単位面積当たりの質量、 E_0 は外管の弾性定数、 λ は定数である。この衝突エネルギー E は、圧接時に心材の塑性変形、熱伝導などにより失われる。電磁圧接後の心材の塑性変形の様子を Fig. 7 に示す。心材の軸方向に垂直な断面の塑性変形による断面減少率を次式で求めると、Table 3 のようになる。

$$\text{断面減少率} = (S_0 - S)/S_0 \times 100 (\%) \quad (2)$$

ここで、 S_0 は圧接前の心材の断面積、 S は圧接後の心材の最小断面積である。断面減少率の大きな心材ほど塑性変形により衝突エネルギーが失われたことになり、良好な接合結果が得られにくいと考えられる。したがって、クリアランスが1.5 mm, 2.0 mm の場合に見られる心材の材質によるリーク破断圧の差異は、この心材の塑性変形が起因しており、塑性変形の大きな心材ほど接合に必要な衝突エネルギーが失われ、良好な接合が得られないことがわかる。

4.1.2 外管が銅の場合

外管にアルミニウムを用いたときと同様、外管に銅、心材にアルミニウム、銅、黄銅、軟鋼を用いた場合の外管と心材のクリアランスに対するリーク破断圧測定結果を Fig. 8 に示す。クリアランスが0.0 mm, 0.5 mm, 1.0 mm の場合、外管にアルミニウムを用いたときと同様な結果が得られた。しかし、クリアランスが1.5 mm の場合、心材の材質に関わらず接合部からの漏水が確認された。これは、

Fig. 6 Relation between Burst pressure and Clearance (Tube : Al).

Fig. 7 Macro structure of cross section (Tube : Cu, Core : Al Clearance : 0.5 mm).

Table 3 Reduction rate (%) of cross section (Clearance : 0.5 mm)

Tube	Core	Reduction rate (%)
Al	Al	12.70
	Cu	5.64
	Brass	1.35
	Fe	0.30
Cu	Al	26.27
	Cu	3.66
	Brass	0.60
	Fe	0.92

外管が銅の場合、アルミニウムに比べ外管の塑性変形に要するエネルギーが大きいため衝突エネルギーが小さくなり、そのためすべての心材が接合まで至らず、心材の塑性変形による接合強度の違いが生じなかったものと考えられる。

また、接合面の脱脂を行わずに電磁圧接を試みた結果をFig. 9に示す。脱脂を行わなかった試験片は、すべてのクリアランスにおいて、脱脂を行ったときの試験片より破断圧は小さく、圧接前の接合面の脱脂は良好な接合結果を得るために効果があることがわかった。

4.2 引張試験による接合部強度評価

4.2.1 外管がアルミニウムの場合

Fig. 10に示すように、外管にアルミニウムを用いたときのクリアランスと引張破断荷重との関係を見ると、クリアランスが0.5 mm のとき、すべての心材において母材（外管）側で破断している。Table 2からわかるように、外管であるアルミニウム（A1050）の引張強さは65 MPa 以上と規定されており、断面積が14.9 mm² であることから、外管は約1.0 kN 以上の引張荷重をかけると破断することになる。しかし、実際の試験片では、約2.0 kN 近傍で外管が破断しており、135 MPa 以上の接合強度があることがわかった。クリアランスが1.0 mm のときも、同様なことが言える。また、クリアランスが1.5 mm, 2.0 mm のとき、軟鋼、黄銅、銅と塑性変形の受けにくい心材の順に接合強度が大

Fig. 8 Relation between Burst pressure and Clearance (Tube : Cu).

Fig. 9 Effect of degreasing on Burst pressure (Clearance : 0.5 mm).

きいことがわかった。しかし、塑性変形が最も容易なアルミニウムを心材に用いたときにも、母材破断に至るまでの大きな接合強度が確認された。これは、クリアランス0.0 mm のときについても同様の結果であった。水圧リーク試験では、クリアランスが0.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm で漏水が認められており、これらの結果からアルミニウムを心材に用いたときについて次のことが言える。心材がアルミニウムの場合、他の材質に比べ圧接による塑性変形量が大きく、全周にわたる接合に至らなくても外管は心材をかしめることが可能である。そのため、リーク試験では漏れが発生し高い破断圧を得られない試験片でも、このかしめ力により引張試験において母材破断に至るまでの引張強度が得られるものと考えられる。

4.2.2 外管が銅の場合

Fig. 11 に示した外管に銅を用いたときのクリアランスと引張破断荷重との関係から次のことがわかる。水圧リーク試験を行ったときの結果と同様に、クリアランスが0.0 mm のとき良好な接合を得ることはできず、0.5 mm のとき最も大きな接合強度が得られた。ただし、外管が破断に至るまでの試験片は、あまり見られなかった。これは、外管である銅(C1020)の引張強さが、約4.7 kN ($\approx 315 \text{ MPa} \times 14.9 \text{ mm}^2$) であり、接合強度より若干大きいことに起因していると考えられる。クリアランスが1.0 mm のときは、塑性変形の受けにくい心材ほど大きな接合強度が得られたが、クリアランス1.5 mm のときには、心材による接合強度

Fig. 10 Relation between Fracture load and Clearance (Tube : Al).

Fig. 11 Relation between Fracture load and Clearance (Tube : Cu).

の差異は認められず、いずれも良好な接合結果が得られなかった。

以上、水圧リーク試験、引張試験による二つの接合部強

度測定の結果から、電磁圧接金属の接合強度について次のようなことが言える。Fig. 4 に示す形状の供試材を用いた場合、接合に最適なクリアランスが存在し、いずれの試験

Fig. 12 Microstructures of the welded region.

Fig. 14 Hardness distribution of the welded region.

結果からも、0.5 mm であることがわかった。心材には塑性変形の受けにくい材質を用いたほうが、外管の衝突エネルギーは失われず、大きな接合強度が得られた。また、外管に銅よりも塑性変形が容易なアルミニウムを用いた場合の方が、衝突エネルギーが大きく、クリアランスの広い範囲で接合が可能であり、また、母材（外管）破断に至るまでの大きな接合強度が得られることがわかった。

4.3 接合界面観察

クリアランスが0.5 mm で全周にわたって良好な接合が確認された試験片の接合界面を、Fig. 12 に示す。程度に差はあるが、すべての接合界面が波状を呈していることがわかった。また、爆発圧接に類似した規則的な波形を呈しているものもあった。これは、爆発圧接の時に見られる衝突点における金属の噴流（メタルジェット）によって生成された波形と類似したものと思われる⁴⁾。また、試験片により波形に差異が見られるのは、心材の塑性変形により外管と

Fig. 13 SEM microstructure of the welded region (Tube: Cu, Core: Al Clearance: 0.5 mm).

の衝突角度が変わるためによるものと考えられる⁵⁾。外管と心材が異種金属の場合、Fig. 13 に示すように金属間化合物の生成が5 μm 以下の厚さで点在して確認されるものも

あった。しかし、ほとんどの試験片において、接合強度を低下させるほどの金属間化合物の生成は認められなかった。

爆発圧接では、メタルジェットが圧接面の酸化皮膜やガス吸着層を除去する働きがある。しかし、本研究では、接合強度の上昇に脱脂の効果が認められており、良好な接合を得るために脱脂は必要であると思われる。

Fig. 14 には、接合界面のマикроビッカース硬さ分布を示す。すべての試料において、外管および心材から接合境界部に向かって、硬度が上昇していることがわかった。これは、外管が心材に高速で衝突し、塑性変形を受けたことにより、加工硬化を起こしたことによるものと考えられる。

5. 結 言

電磁圧接装置（マグネチック・インパルス溶接機 H126M）を用い、外管にアルミニウム、銅、心材にアルミニウム、銅、黄銅、軟銅を使用して電磁圧接を試みた。本研究において、コンデンサーの充電電圧を 14.0 ± 2.5 kV に設定した。接合試験片について水圧リーク試験、引張試験による接合強度測定、接合界面観察を行った。得られた結果を要約すると以下の通りであった。

1) 外管、心材の材質に関わらず、接合に最適な外管と心材の間のクリアランスが存在し、それは、Fig. 4 に示す形

状において、0.5 mm であった。

2) 外管の材質は、銅よりも塑性変形の容易なアルミニウムを用いた方が、クリアランスの広い範囲で接合が可能であった。

3) 塑性変形の受けにくい心材を用いたときほど、接合部全周にわたる良好な接合が得られた。

4) 電磁圧接直前に行う接合面の脱脂は、良好な接合を得るために効果があることがわかった。

5) すべての接合界面は波状を呈しており、爆発圧接の接合界面に類似した規則的な波形を呈しているものもあった。また、外管および心材から接合境界面に向かって硬度の上昇が認められ、塑性変形による加工硬化が確認された。

参 考 文 献

- 1) 益本、玉置、小嶋：“アルミニウム管とアルミニウムおよび異種金属心材との電磁圧接”，溶接学会誌，49-1 (1980)，p. 29-34.
- 2) W.F. BROWN, J. BANDAS, N.T. OLSON: “Pulsed Magnetic Welding of Breeder Reactor Fuel Pin End Closures”, Welding Journal, 57-61 (1978), p. 22-26.
- 3) 小嶋、玉置、鈴木、佐々木：“電磁圧接の変形抵抗ならびに圧接に要する衝突速度と加速度”，溶接学会論文集，7-1 (1989)，p. 75-81.
- 4) 富安：“爆発圧接”，金属材料，7-3 (1976)，p. 31-35.
- 5) 恩沢、石井：“爆発圧接境界の波形成に関する研究”，溶接学会誌，41-4 (1972)，p. 102-111.